

都市地下の利用

The Use of Urban Underground Space

根上 義昭*

Yoshiaki Negami

はじめに

動物の世界では外界から身を守るため、あるいは厳しい自然の気候のなかで生きていくために土のなかに穴を掘り、また自然の穴を利用して生活しているものが多い。人類も誕生以来穴居生活を続けてきたと考えられ、人類と地下空間との関わりは太古よりあったと言える。近代においては鉱物資源の採取のため、或いは交通のためのトンネルが掘られ、山を縦りぬいて地下発電所が作られる等大深度の地下との関わりも多くなった。

都市の地下はこれまで地下鉄、地下道、共同溝、上下水業、ガス、電力、通信、等のインフラストラクチャーや、地下街、地下駐車場、デパートの地下売場などの地下室、および都市周辺でのLNGやLPG、石油などのエネルギー地下貯蔵などに利用されてきた実績がある。最近になって、都市集中、とくに首都東京への人口集中による地上の混雑と地価高騰、さらに昭和63年6月に閣議決定された「総合土地対策要綱」のなかで大深度地下の公的利用が指摘されたことなどが引き金となって地下空間の利用が注目を集め、活発な議論が展開されている。この稿では地下利用の現状について概説し、今後の展開の見通しなどについて私見を述べる。

1. 地下利用の現状

海外の地下利用の現状をみると、中国では黄河流域の黄土高原にヤオトンと呼ばれる地下住居があり、現在でも数千万人が居住しているといわれ、一方では北京や上海には数多くのシェルターが造られていて地下工場やホテルなどに利用されているという。西ドイツのケルンには地下コンサートホールがあり、フィンランドのヘルシンキには地下教会がある。米国ではミネ

ソタ州ミネアポリスのミネソタ大学地下研究所が有名であり、カンサスシティの石灰岩採掘跡地は倉庫やオフィスとして活用されている。カナダのトロントやモントリオールでは地下歩行者ネットワークがつけられ、快適な生活が営まれている。この他まだ数多くの地下空間活用事例が紹介されている。ここではこれらの詳しい説明は省略するが、これらに共通して言えることは、何れも地盤が堅固な、或いは掘りやすい岩盤であること、また自然環境も夏期の酷暑或いは冬期の酷寒等厳しい条件の場所である。しかし非常に深いところに造られたものは少ない。

わが国の都市域における地下利用を見ると、これまでに開発された地下空間は殆どが比較的浅い部分の地下に限られている。北欧などでは地下空間の利用は建設コストが安いという理由で盛んであるが、日本で都市部の地下に空間或いは施設を建造しようとする、地上に同規模のものを建造する場合に比べ、一般にかなり工事費が割高になる。それは以下のような理由による。

(1) ヨーロッパやアメリカの地下開発の盛んな都市が、多くは良好な岩盤に立地しているのに対し、日本の都市部はその多くが河口部の土砂堆積層の上に立地している事が多い。そのため地山を掘削する際、土砂が崩壊しないように土留め工を施さなければならない。上部に土砂や構造物がある場合には、それが崩落しないように支えなければならない。

(2) 日本の都市のように、土砂の堆積した地層では、通常地下水が豊富に存在する。地下掘削に伴って地下水が湧出するが、これを汲み上げると周囲の地盤沈下を招くので、現在は地下水の汲み上げが各地で規制されている。従って掘削を行っても地下水が内部に出ないように、止水工法を工夫しなければならない。この結果、掘削深さに比例して地下水圧が増大するので、その水圧に抵抗する対策を施さなければならない。

(3) 地下を掘った土砂を運搬処分しなければならない

* 清水建設(株)土木本部技術第1部長

〒108 東京都港区三田3丁目13-16三田43森ビル12F

表1 これまでの諸施設の深度例¹⁾

用途	名称	深さ	備考
建築地階 (店舗・駐車場等)	富国生命本社ビル	約26m	開削工法, 仮設深礎GL-28.3m山留め(地中連壁) GL-28.7m
図書館 (書庫・機械室)	国立国会図書館新館	約30m	開削工法, 山留め(地中連壁) GL-34m
変電所 (変圧機械室)	東電九段変電所	約36m	開削工法, 山留め(地中連壁) GL-40m
地下駅及び トンネル	新幹線上野地下駅及び 第2上野トンネル	駅部約30m	駅部開削工法(4層), トンネル部切羽開放型 シールド(圧気工法併用) φ12.6m
地下駅及び地下鉄	京葉線東京地下駅及び 京橋トンネル	駅部約30m	駅部開削工法(4層, 建設中) トンネル部泥水加圧式MFシールド φ7.2×11.97m(貫通済)
地下駅及び地下鉄	千代田線国会議事堂前	約40m	手掘り式シールドφ8.6m
洪水調節用トンネル	平野川水系街路下調節池	約30m	泥水加圧式シールドφ11.0m
地下駅	高速3号線三ッ沢上町駅	約33m	NATM工法(排水工法併用), 高さ11m, 幅17m
地下タンク	袖ヶ浦LNG地下式貯槽	約45m	開削工法(円筒形掘削, 地中連壁)

注) シールドのφはセグメント外径である。

ないが, 道路交通の混雑による能率の低下と投棄場所の不足による遠隔化により非常に高いコストがかかる。

(4) 地上に比べて作業がやりずらいため手間がかかる。

(5) 地上の工事に比べて建設期間が長くなり, 工事経費や金利などが割高となる。

従って, 建設費が高いにもかかわらず, あえて日本の都市部で地下を利用しようとするのは次のような場合であると考えられる。

(1) 地上に建設することができない。例えば既に地上に道路や鉄道などの施設があって, その上空には建設できない場合。立体交差等。

(2) 地上に建設するよりは有利。たとえば,

- a 地上に建設すれば非常に高さが高くなる。
- b 地上に建設すれば日照上問題がある。
- c 地上に建設すれば騒音の問題がある。
- d 地上に建設すれば景観を損なう。
- e 地上に建設すれば万一破損した場合危険が大きい(LNG地下タンクなど)
- f 地上に比べてエネルギーロスが少ない。

(3) 地上のオープンスペースは人間のために保存しておく。

(4) 地下でなければならぬ特別の理由がある。

- a 紫外線などを避ける。例えば美術品, 図書の保管。

b 振動を避ける。例えば精密加工, ホログラフイー撮影。

c 盗難を避ける。銀行の金庫室等。

d 放射能から逃れる。シェルター, 放射性廃棄物貯蔵。

(5) 地下を利用することにより用地費が軽減される。例えば従来の地下鉄や地下街は, 大部分が道路下に建設されているため, 用地買収費は大幅に軽減されている。

2. 地下空間の特性

このように地下空間利用の理由は色々あるが, ここで経済性の議論は別として地下空間の優れた特性を整理してみると,

- (1) 自由な空間であり, 立体交差が容易。
- (2) 構造物としての安定性, 耐震性。
- (3) 遮蔽性, 防音性。
- (4) 断熱, 蓄熱, 恒温性。
- (5) 隠蔽性, 環境への影響を与えない。

等が挙げられる。一方地下空間のマイナス面としては

- (1) 建設費が高い, 工期が長い。
- (2) 太陽光線の利用が困難。
- (3) 方向感覚がなくなる。
- (4) これまでの地下に対するイメージがあまりよくない。例えば,

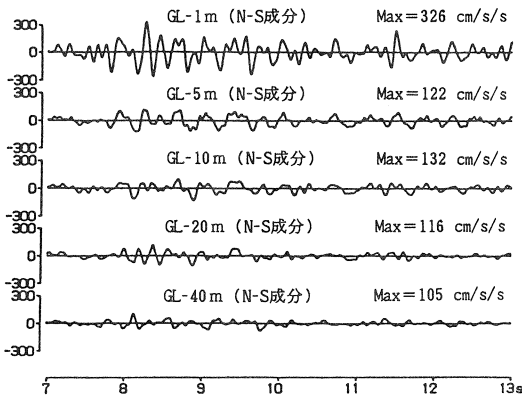


図-1 異なる深さの地震加速度波形 (千葉県東方沖地震)²⁾

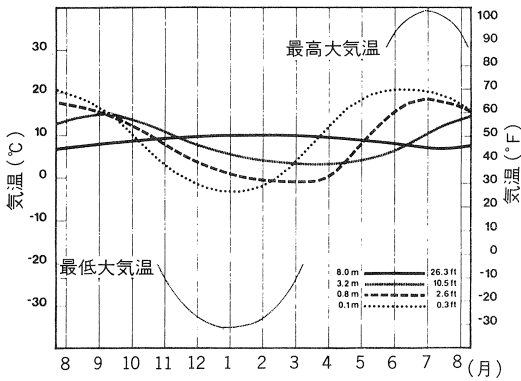


図-2 年間の温度変動(ミネソタ州ミネアポリスの例)³⁾

- a 地下には太陽がないので、暗く、じめじめしている。
- b 外が見えないので、迷路のような、閉塞された感じがする。
- c 昔から地下は死後の世界、非合法の世界の代名詞。

等がある。地下空間の開発にあたってはこれらの特性のうち、利点は生かし、欠点は克服してその利用をはかっていかなければならない。

3. 最近の地下空間建設技術

今後、より大深度の地下空間を開発利用しようとするとき、その建設のための技術はどのくらい進んでいるかが問題となろう。ここでは最近開発が進み、実用に供することができるようになった大深度地下建設技術のいくつかを紹介する。

3.1 土留め支保工の技術

地山の掘削を行なうとき土砂が崩れないように土留めを作り、それを支えるのが土留め支保工と呼ばれるものである。以前はシートパイルか鋼材を打ち込んで矢板などで地山を押さえ、それが倒れないように鋼材などで突っ張りを取り付ける方法が一般的であった。軟弱な地層や地下水の豊富な砂層等を数十メートルの深さまで掘り下げるにはこのような方法では困難であり、近年普及してきたのが地中連続壁である。これは地山に回転式ビットやクラムシェルバケットで溝を掘削しながらベントナイト泥水をそのなかに満たし、掘り上げた溝のなかに鉄筋を差し込んでからコンクリートとベントナイト泥水を置き換える工法である。大深度の地下を掘削しようとするとき、水圧は深さに比例して増大するので極めて大きいものとなる。そのため地中連続壁の厚さも大きくなり、現在では壁厚3.2m、深さ150mまで施工可能である。このような工法を使って東京湾横断道路の川崎人口島で計画されている堅坑のような深さ70mもの空間が建設可能となった。大深度の場合、強大な土圧と水圧に抵抗するには円筒形の構造のほうが有利である。これは土圧、水圧による曲げ力に抵抗しようとするとき鋼材の量とコンクリートの

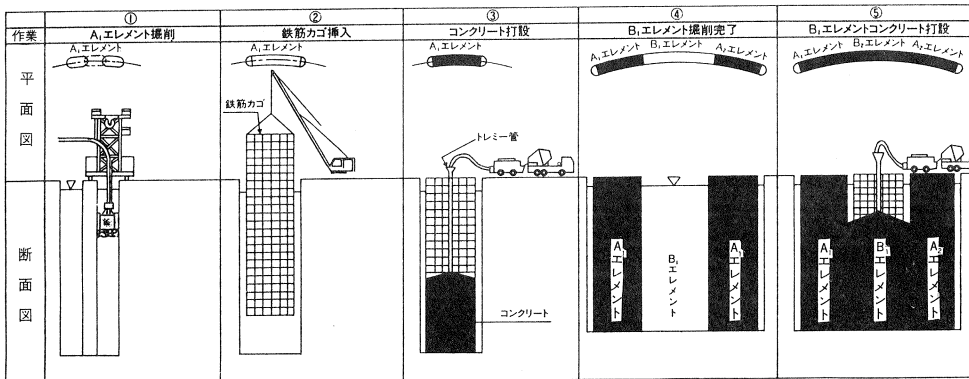


図-3 地中連続壁の施工順序

厚さが大きくなり、不経済となるのに対し、円筒形の場合はシェルとして働くため、コンクリートの圧縮強度が軸力に対して有効に利用できる為である。

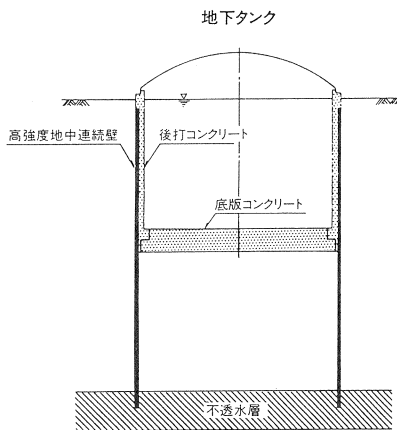


図-4 円筒形の地下構造物 (LNG地下タンクの例)

3.2 シールド工法

シールド工法は大深度地下空間の建設に不可欠の技術である。初期のシールド工法は、人力掘削による圧気工法が盛んに用いられていたが、最近では泥水加圧式、泥土加圧式、気泡シールドなどトンネルの切り羽が密閉されたものが主体になっており、シールドマシンの運転はセンサーを用いて計測したデータによりリモートコントロールされる情報化施工になっている。

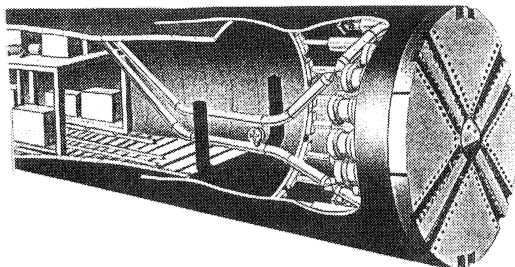


図-5 シールドマシン (泥水加圧式の例)

シールドの直径が大きくなり、トンネルの深さが深くなるに従い、マシンの外側を覆っている鋼板が厚いものとなり、加工技術が困難になる。また水密性を要求される部分の構造も工夫を要する。トンネルの構造体となるセグメントについても同様で、大深度に大きいトンネルを造ろうとすれば、厚さの増大と同時に止水に工夫が必要である。現在の技術水準で直径14m程度は可能と考えられており、今後20mに挑戦する計画もある。深さについては40m~50m程度までの実績はあ

り、現在の技術で70m程度は可能と考えられている。一方、トンネルが深くなるほどシールドマシンの発進、到達のための堅坑も深くなるのでその費用も増大する。そのためトンネルの長さをできるだけ長くするのが経済的であるが、片側からの掘進には限界がある。そこで、堅坑を作らないで、地中の互いに向かいあって進んできたシールドマシン同士を接続する技術がある。従来行なわれた方法は、凍結工法と呼ばれるもので、接近したマシンの周りの土砂を凍らせて、地下水の侵入を防いでから内部を掘って接続するものである。さらに、最近開発されたものに、メカニカル・シールド・ドッキング工法がある。接続すべき2台のマシンに予め貫入接合のための機構を組み込んでおき、接近した時点で機械的に接合するものである。この工法の利点は、凍結のための期間が不要の為工期が短かくてすむ事と、地盤の凍上、融解による影響がないことである。円形以外に異形断面シールドも各種開発されつつあり、今後四角形や楕円形といったさまざまな形のものも造られるようになると思われる。また、トンネルの分岐、合流、拡大、縮小が可能なシールド工法も研究されている。

3.3 NATM工法

NATM工法は、当初オーストリアで考案された工法であり、岩盤の山岳トンネルでは日本でも近年数多く採用されるようになったが、土砂地盤での実施例はまだ少ない。この工法は、地山そのもの持っている強度を生かして、トンネルを掘削しようとするもので、トンネルを掘り進みながら吹きつけコンクリートとロックボルトを用いて穴の周辺を固めるものであり、自由な断面を作ったり、広い空間を作ったりする場合に有効な工法である。地下水の湧出する地山での施工は困難ではあるが、日本独自の工夫で今後改善が加えられ、大深度地下空間での利用が可能になるとと思われる。現

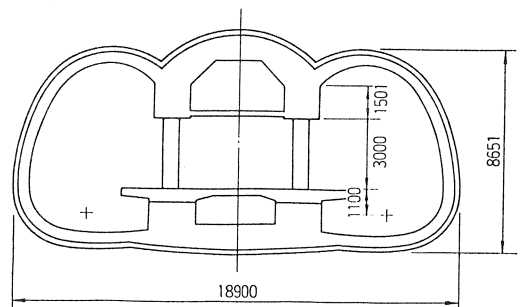


図-6 都市域土砂NATM工法による地下駅の断面例

在東葉高速線の地下駅の建設でこの工法による大断面掘削が採用されているが、この場合は地下水対策として、ディープウェルによる揚水と、薬液注入が用いられている。

3.4 地下探査技術

地下での工事を行なう場合、地盤がどのようなになっているのか、障害物があるのかどうか、地下水位はどうかなど色々な情報がほしい。しかし現実にはボーリングにより部分的に調査されたデータだけを頼りに工事を行なわなければならないのが普通であり、地下の状況は大部分が手探りである。最近になって、地下のレーダーによる探査技術に若干の進歩が見られ、地表からあまり深くない範囲の埋設物や障害物、或いはトンネルの切り羽から数メートルまでの地盤状況がある程度わかるようになってきた。ボーリング孔内の観察の技術としてはこれまでも胃カメラ同様のポアホールカメラがあったが、より精度の高い観察をするべく開発されたものにポアホールスキャナーがある。これはボーリング孔の内部を連続的にビデオカメラで撮像し、モニター画面に展開画像を再生するものである。そのほかに利用可能な技術として地下埋設物のマッピングシステムがある。これは都市域における全ての埋設物がどのように埋められているかを残らず記入された情報が、簡単な手続きで検索できるように作られたシステムである。また地下水の流れる状況を調査する技術も開発されている。

4. 今後の都市地下の利用

地下空間の利用が脚光を浴びだしてから諸々の提案や、計画が発表されている。新聞や雑誌などを毎日のように賑わしているので、ここでは詳しい説明は省くが、主な利用分野についてまとめてみることにする。

4.1 交通運輸施設

都市域の交通機関の混雑については今更述べる迄もないが、この混雑緩和の切札と考えられているのが大深度地下鉄と弾丸道路であろう。東京の地下鉄道網は昭和のはじめに浅草から上野の間で開通して以来、数多くの路線が建設されてきており、今後の建設計画も目白押しであるが、最近の傾向を見ると、建設に要する期間が非常に長くなっているようである。これは、沿道居住者の建設反対運動による影響や、用地確保に折衝時間を非常に長く必要とすることなどによる。今後大深度地下空間の私権制限に関する法案が成立すれば、このような原因で建設が遅れるということは無く

なり、且つ、直線的なルートを選定できる為、最短距離を走ることが出来るようになる。大深度鉄道で問題となるのは、乗客の昇降設備である。ロンドンやモスクワには可成の大深度の地下鉄があり、特に問題なく乗客が乗り降りしているようであるが、深さ60mから70mともなれば、現在の東京地下駅の地下5階のホームや上野の新幹線ホームの2倍の深さであり、エスカレータの速さを現在の毎分30mの2倍程度にする必要がある。都市の過密による地価の高騰が問題になっているが、都心部と郊外を大深度地下で結ぶ高速地下鉄が出来れば、通勤圏も広がり、土地問題の解決にもつながるとの提案もある。

自動車交通のための弾丸道路を大深度に建設してはどうかという考えもあるが、道路の場合は地上へのアクセスが問題であり、あまり深度が大きいと取りつけ部分の距離が長くなって経済的でない。また、防災対策についても研究すべき課題が多いという意見もある。しかし、バリの例を見る迄もなく、今後地上或いは高架の道路を都心部に建設するのは現実的ではなく、地下空間に道路が増えていくのは確実であろう。

地下に歩行者の為の道路網を造ろうとするのが地下歩行者ネットワークであるが、東京のように地上の交通が混雑しているため、歩行者と自動車を分離しようとするものと、北海道や東北、上越など冬期の気象条件が厳しい地方で歩行者の為の快適な空間を確保しようとするものが考えられる。

4.2 上水、下水

上水道と下水道は、現在でも地下に造られているが、殆どの場合、公道の下の、それも比較的浅い部分に埋設されている。都市インフラの整備が進むにしたがって、道路下部の空間は輻輳してきており、新規の埋設物を入れるスペースが限られてきている。都心部の過密が進むと益々容量が不足する。さらに現在使用中の上水道、下水道とも老朽化が進み、修理、交換しなければならない部分が多くなっているようであるが、地上交通の混雑の為昼間作業は出来ず、夜間作業をしようとするれば騒音問題による周辺住民の苦情や労務不足など、色々問題が多い。そのため大深度地下の利用が可能となれば、そこに幹線を新しく設置してこれらの問題を解決しようという考えがある。

4.3 電力、ガス等のエネルギー施設

都市域でのエネルギーは殆どが電力とガスによって供給されているといっても過言ではあるまい。電力の場合架空電線によるものは都市美観上の問題もあって

徐々に姿を消していくことであろうが、現在でも共同溝やCABシステム、地中電線路等地下が利用されている。今後オフィスビルの電力消費形態の変化により低圧受電の需要が増大してくると、都心部に沢山の変電所が必要になると考えられ、これらは殆どが地下変電所となる。また、都市域の電力消費量の伸びに伴って超高圧送電路や超高圧地下変電所の増設も必要であろう。一方で電気エネルギーの需要の変動状況を見ると、ピーク時の需要の伸びが著しく、設備の効率を高めるためには何らかの電力貯蔵が必要である。これまでは揚水発電所がこの目的のために建設され、利用されてきたが、エネルギーのロスが大きく、これに代わる電力貯蔵法の開発が望まれている。その一つとして考えられているのが圧縮空気貯蔵である。これは地下数百メートルの深さに作られた空洞に数十気圧の圧縮空気の形でエネルギーを貯蔵し、これによりタービンを回して発電するものであり、西ドイツでは既に実施されている。最近では空気の代わりに都市ガスとして使用する天然ガスを高圧で貯蔵して発電する試みがスウェーデンで行なわれているとのことである。効率のよいバッテリーの開発も望まれているが、これが、開発されればその貯蔵場所としては地下空間が最適であろう。エネルギーの効率的利用形態として注目されているものに、コジェネレーション（熱電併給）システムがある。これは、都市ガスによりタービンを回して発電を行ない、その際発生する熱も冷暖房用熱エネルギーとして利用するもので、極めて効率の高いものである。このような設備を設置する場合ビルの地下を利用することになる。都市ガスは、かつては石炭ガスや石油ガスが使用されていたが、近年その大部分が天然ガスに切り替えられ、単位量当たりの熱量が倍増したため、ガス管の供給能力としてはまだ余裕があると考えられるが、今後の需要の伸びを考えれば近い将来高圧から低圧までのガス導管の増設も必要となる。

4.4 その他

地下に大空間が造られ、人間の居住が可能になれば、

最近色々と発表されているような地下都市が建設されるのも夢では無くなる。前述のように地下空間には色々な優れた特性があり、その中でも大地の持つ巨大な熱容量と断熱性による恒温性は、極めて良好なエネルギーパフォーマンスを実現するものと期待される。快適な生活空間を確保するためには、照明、空調などの適切なコントロールに加えて、太陽光線を少しでも採り込むとか、木や草の緑、水の流れる音などが効果的であると言われている。さらに、壁面に地上の風景を映し出すなどの技術も応用されることと考えられる。

5. むすび

以上、都市地下空間の利用状況、地下空間の特性と建設技術の現状、そして今後の都市地下の利用について簡単に述べた。地下空間で人間が活動するためには照明設備が絶対に必要であり、また大深度になるほど地上とのアクセスの為のエスカレータやエレベータの重要性は高まる。さらに、環境制御や防災の為の情報システムや設備が機能しなければ、大変なことになる。そのためには電気エネルギーの供給が万が一にも断たれることがあってはならないし、快適環境の維持の為には都市ガス他熱エネルギーの安定且つ安全な供給が不可欠である。現在、各省庁、関係機関が委員会や研究会を組織して地下空間の開発にかかわる問題に取り組んでおり、環境を破壊せず、安全で快適な都市地下空間の利用が計画的に行なわれる日も近いものと期待される。

参 考 文 献

- 1) 三宅紀治；都市地下空間の有効利用と技術課題，日本不動産学会誌，Vol. 4，No. 4（1989），65-71.
- 2) 佐藤・片山；千葉県東方沖地震による地振動と地盤ひずみの記録，第16回地盤振動シンポジウム，日本建築学会1988，7，14.
- 3) 渡辺与四郎他；地下建築物のデザイン手法（1987），丸善（株），p14.